

УДК 551.24.035

## ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ОСНОВНЫХ СТРУКТУР АМЕРАЗИЙСКОГО БАССЕЙНА

© 2018 г. Член-корреспондент РАН Л. И. Лобковский<sup>1</sup>, И. А. Гарагаш<sup>2</sup>, Д. А. Алексеев<sup>1,2,\*</sup>

Поступило 28.12.2017 г.

Выполнен геодинамический анализ эволюции Амеразийского бассейна, основанный на моделировании напряжённо-деформированного состояния. Показано, что вследствие растекания астеносферы в зоне возвратного потока мантийной конвекции происходит формирование двух локальных поднятий, которые можно рассматривать в качестве хребта Ломоносова и поднятий Менделеева и Альфа, а дальнейшее долговременное действие конвекции приводит к формированию котловин Макарова и Подводников.

DOI: 10.7868/S0869565218160181

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [3, 8–11] развита общая геодинамическая модель эволюции Арктического региона в мезозое и кайнозое, основанная на представлении о верхнемантийной конвекции, обусловленной непрерывным конвейерным погружением Тихоокеанской литосферы в зонах субдукции. В этой модели фронт продвигающейся под континент верхнемантийной ячейки рассматривается как восходящий возвратный мантийный поток, ослабляющий прочность литосферы (рис. 1). Под действием растягивающих напряжений, вызванных “волокущей” силой сцепления возвратного потока с подошвой литосферы, происходит механический отрыв литосферных блоков в виде хребтов Альфа и Менделеева от Баренцево-Карской окраины и будущего хребта Ломоносова, сопровождаемый образованием областей с утонённой континентальной корой в их тылу, формирующих котловины Макарова и Подводников.

Отметим, что прогрев литосферы ведёт к формированию глубоководных котловин и поднятий [5]. Подобная картина получается и при развитии конвективных движений в мантии [6, 7].

В настоящей работе приводится анализ вертикальных движений литосферы Амеразийского бассейна, основанный на моделировании геодинамической эволюции рассматриваемой области в рамках двухмерного (2D) приближения с учётом верхнемантийной конвекции, сопровождающей процесс субдукции Тихоокеанской плиты.

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской Академии наук, Москва

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской Академии наук, Москва

\*E-mail: alexeevgeo@gmail.com

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ АМЕРАЗИЙСКОГО БАССЕЙНА

Для моделирования деформаций, происходящих в литосфере (рис. 1), создана расчётная схема в виде упругопластической литосферной плиты (рис. 2), деформирующейся конвективными движениями в вязкоупругой верхней мантии. Анализ геодинамической эволюции выполняется в квазистатическом приближении, при котором инерциальный член уравнения движения принимается равным нулю. В качестве определяющих соотношений (материальных моделей) для коры и литосферы используется упругопластическая модель с предельным условием Кулона–Мора, а астеносфера считается вязкоупругой. Значения геомеханических параметров приводятся в табл. 1. Граничные условия включают запрет вертикальных смещений на нижней границе модели, а также горизонтальных смещений на её боковых границах. Расчёты выполнялись с использованием программного кода FLAC<sup>3D</sup> [Itasca, 2006].

Расчёт напряжённо-деформированного состояния осуществляется в несколько этапов, очерённость которых соответствует хронологии физических процессов, протекающих в недрах.

На первом этапе моделируется состояние, отвечающее упругому приближению и не учитывающее возможных пластических деформаций и вязкого течения (ползучести). При этом все элементы модели рассматриваются как упругие, и напряжённо-деформированное состояние находится в результате итерационного процесса по явной расчётной схеме при достижении приемлемого уровня



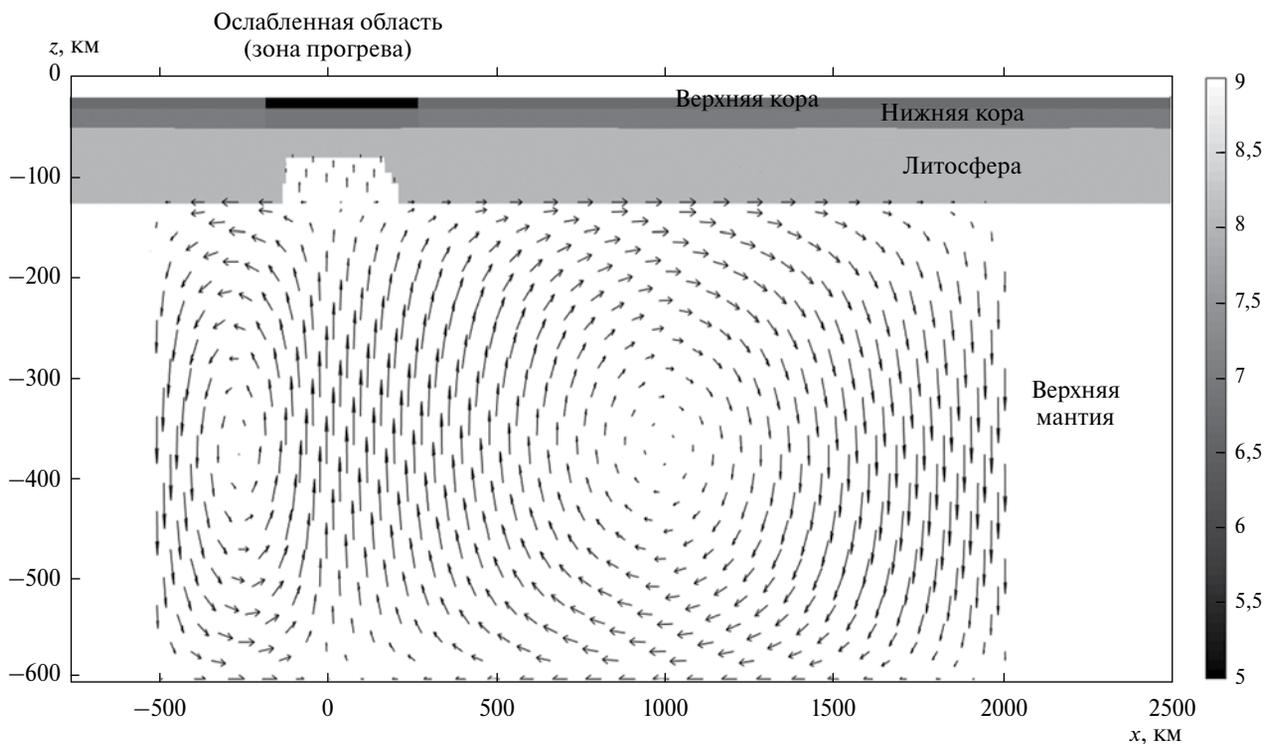
**Рис. 1.** Модель верхнемантийной ячейки под континентом, вызванной процессом субдукции Тихоокеанской литосферы для Арктического региона, приводящей к формированию хребта Ломоносова (ЛП), блоков в виде хребтов Альфа и Менделеева (АМП) и образованию котловины Макарова и Подводников (МК).

невязки уравнения движения, отвечающего состоянию равновесия.

Под действием сил собственного веса с учётом вязкого течения астеносферы модель приходит в латерально-однородное напряжённо-деформированное

состояние, при этом верхняя граница модели (дневная поверхность) погружается на глубину около 25 км относительно своего первоначального положения.

На следующем этапе моделирования предполагается, что в зоне восходящих движений в результате



**Рис. 2.** Модель литосферы и конвективных движений в верхней мантии.

**Таблица 1.** Значения геомеханических параметров различных элементов моделей

Элемент модели	Объемный модуль упругости, $10^{11}$ Па	Модуль сдвига, $10^{10}$ Па	Угол внутреннего трения	Сцепление, Па	Вязкость, Па · с
Верхняя кора	1,29	4,3	20°	$1 \cdot 10^7$	—
Ослабленная зона	1,03	3,4	16°	$8 \cdot 10^6$	—
Нижняя кора	1,35	4,5	20°	$2 \cdot 10^7$	—
Ослабленная зона	1,08	3,6	16°	$1,6 \cdot 10^7$	—
Литосфера	2,16	7,2	8°	$2 \cdot 10^8$	—
Ослабленная зона	2,16	7,2	—	—	$1,25 \cdot 10^{21}$
Астеносфера	2,16	7,2	—	—	$1,25 \cdot 10^{21}$

локального разогрева происходит частичное расплавление литосферы, а прочность утонённой верхней части уменьшается. Таким образом, перемещения и деформации в земной коре формируются под действием мантийных потоков и адаптации системы литосфера—астеносфера к изменению формы подошвы литосферы [5]. Причём скорость последнего процесса значительно выше, чем скорость вращения конвективной ячейки.

Поведение модели в окрестности ослабленной зоны, имитирующей область литосферы, утонённой за счёт подъёма её подошвы, заполненного вязким веществом, под действием сил собственного веса, определяется процессами растекания вязкой астеносферы, которые имеют достаточно сложную картину в пространстве и времени. На начальном этапе нагружения преобладает выдавливание астеносферы в пределах ослабленной зоны вверх, сопровождаемое развитием вертикальных смещений в литосфере над её осью. Над флангами астеносферного выступа (в проекции на дневную поверхность на расстояниях 200—300 км от оси) также отмечаются горизонтальные смещения в направлении от оси зоны с амплитудой до первых тысяч метров. При этом в указанных областях наиболее быстрыми (до 10 см/год) являются движения, происходящие не в горизонтальном, а в вертикальном направлении.

Затем поднятие в пределах литосферы непосредственно над ослабленной зоной сменяется погружением, а рост “хребтов” над её флангами продолжается. Распределение смещений и их скоростей приобретает характер двухъячеечной циркуляции, при этом центры вращения ячеек локализируются в верхней части астеносферы на удалении порядка 200 км от оси ослабленной зоны. Таким образом, наблюдается процесс формирования двух локальных поднятий, ассоциируемых с хребтами Ломоносова и Альфа—Менделеева, амплитуды которых (максимальные вертикальные смещения дневной поверхности) достигают 3 км за время порядка 8 млн лет.

Последующий этап эволюции модели предполагает долговременное действие “волокущей” силы сцепления на границе возвратного потока с подошвой литосферы. Для моделирования геодинамической эволюции коры в зоне развития субдукции и тепловой конвекции циркуляция астеносферного вещества задавалась явно в виде поля скоростей, показанного на рис. 2 и имитирующего две конвекционные ячейки.

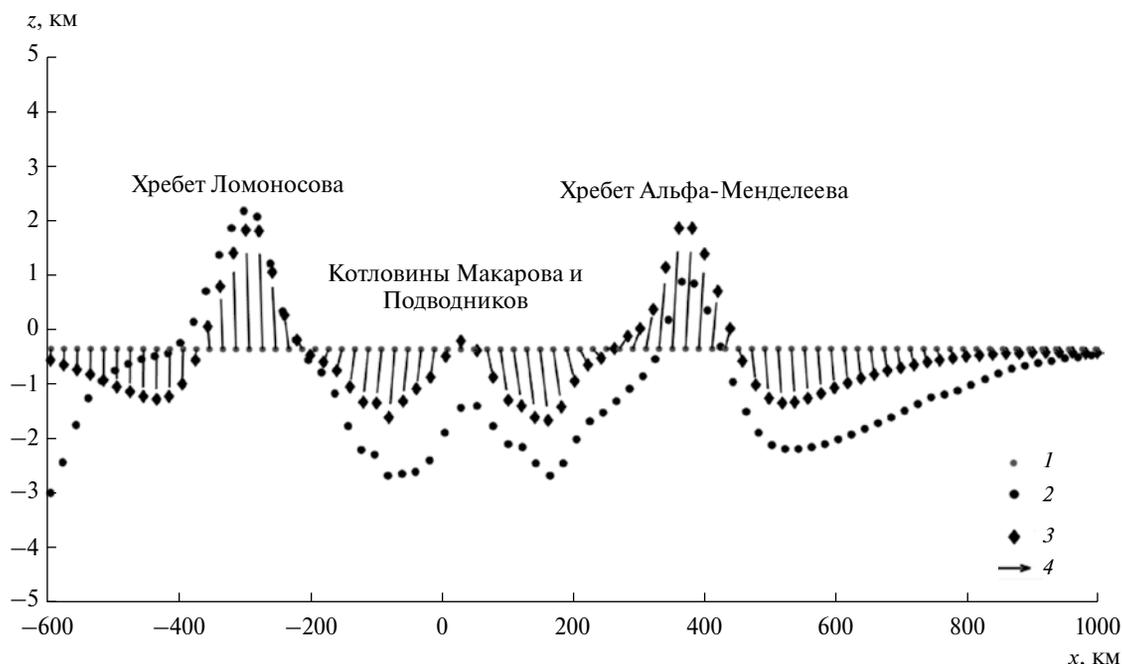
Хотя моделируемые конвекционные ячейки имеют различный механизм — под континентом движущей силой является субдуцирующая плита, а под океаном конвекция имеет тепловую природу, — характерные скорости циркуляции мантийного вещества имеют одинаковый порядок и могут достигать нескольких сантиметров в год. Горизонтальные размеры ячеек составляют: 500 км для тепловой ячейки; 2000 км для субдукционной ячейки.

В вертикальном направлении обе ячейки распространяются на всю глубину астеносферы — от подошвы литосферы до подошвы переходной зоны мантии (670 км). Максимальная скорость в ячейках принята равной 1 см/год.

Приложение в указанной области поля скоростей достаточно быстро приводит к установившемуся состоянию вязкоупругой части модели, сопровождаемому упругопластическими деформациями коры и литосферы.

При указанных параметрах конвекционных ячеек деформации, наблюдаемые на рис. 3, накапливаются за время порядка 1,5 млн лет. Следует отметить, что динамика смещений (деформаций) поверхности модели при установившейся верхнемантийной конвекции является не столь интенсивной, как на этапе растекания в пределах ослабленной зоны при отсутствии конвекции.

Наблюдаемые в проведённом численном исследовании скорости смещения поверхности литосферы, достигающие 2000 м за 1 млн лет, безусловно, следует отнести к аномально высоким. В то же время для некоторых осадочных



**Рис. 3.** Сопоставление смещений земной поверхности в процессе растекания астеносферы из зоны прогрева и в результате действия верхнемантийной конвекции; 1 – положение узлов исходной сетки; 2 – положение узлов после приложения поля скоростей конвекционных ячеек (1,5 млн лет); 3 – положение узлов после введения ослабленной области (8 млн лет); 4 – смещение узлов относительно исходного положения.

бассейнов (например, Южно-Каспийская и Южно-Баренцевская впадины) описаны ситуации погружения, характеризующиеся аналогичным порядком скоростей (0,5–2 км/млн лет). В работах [1, 2] аномальное погружение объясняется процессом эклогитизации литосферы, при этом роль её растяжения полагаем незначительной. Полученные нами результаты указывают на возможность быстрых деформаций коры в рамках достаточно ясного механизма

верхнемантийной конвекции, связанного с субдукцией литосферных плит, и не требуют привлечения экзотических геодинамических моделей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование геомеханической эволюции структур Амур-Камчатского бассейна является важным элементом исследований, направленных на уточнение представлений о глубинном геологическом



**Рис. 4.** Сейсмостратиграфия по линии “бассейн Амундсена – хребет Ломоносова – котловина Подводников – поднятие Менделеева – Чукотское плато” [13].

строении Арктики и протекающих там геодинамических процессах [3, 8–11, 13].

Проведённые нами расчёты показывают, что растекание астеносферы из зоны прогрева увлекает литосферу за собой, и возникающие вязкие силы вызывают её погружение [14] и формирование двух локальных поднятий (рис. 3) в окрестности зоны ослабления, которые можно рассматривать в качестве хребта Ломоносова и поднятий Менделеева и Альфа.

Дальнейшее долговременное действие “волокушей” силы сцепления на границе возвратного потока с подошвой литосферы приводит к развитию погружения литосферы и формированию котловин Макарова и Подводников (рис. 3).

Сравнение рис. 3 с сейсмостратиграфическим разрезом (рис. 4) показывает совпадение характерных особенностей строения морского дна с результатами расчётов.

Вытекающие из результатов проведённого моделирования темпы прогибания и воздымания коры (первые тысячи метров за время порядка 1 млн лет) соответствуют известным эпизодам ускоренного осадконакопления, отмечаемым в ряде глубоких бассейнов. Ускоренные темпы осадкообразования могут быть связаны с некоторым ускорением процессов (палео) субдукции на периферии бассейна и, как следствие, возрастанием скорости деформации коры.

Подводя итог, необходимо отметить, что рассмотренная в работе модель, её параметризация и учёт тех или иных процессов с помощью соответствующих начальных и граничных условий, безусловно, не отражают картину реального напряжённо-деформированного состояния рассматриваемой территории, а играют роль лишь некоторого идеализированного приближения. На следующем этапе исследований предполагается провести уточнение модели, дополнив её соответствующей тепловой задачей, и изучить влияние процессов теплопереноса на динамику напряжённо-деформированного состояния.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149–2018–0015).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюшков Е.В.* Образование сверхглубокого Северо-Чукотского прогиба вследствие эклогитизации нижней части континентальной коры. Перспективы нефтегазоносности // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 61–74.
2. *Артюшков Е.В.* Механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Растяжение литосферы или эклогитизация? // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 1675–1686.
3. *Вержбицкий Е.В., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Бяков А.Ф.* Возраст хребтов Альфа-Менделеева и Ломоносова (Амеразийский бассейн) // ДАН. 2011. Т. 441. № 3. С. 380–383.
4. *Вержбицкий Е.В., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Бяков А.Ф.* Возраст и генезис структур Амеразийского бассейна // Физика Земли. 2012. № 11/12. С. 3.
5. *Гарагаш И.А., Иогансон Л.И., Шлезингер А.Е.* Орогенные, глубокие платформенные и агрессивные осадочные бассейны и физические механизмы их образования // Вестн. ОГГГН РАН. 2000. № 4(14).
6. *Гарагаш И.А., Иогансон Л.И., Шлезингер А.Е.* Осадочные бассейны, связанные с трансформированной консолидированной корой: особенности современной структуры и механизм образования // Геотектоника. 2005. № 6. С. 32–41.
7. *Гарагаш И.А., Лобковский Л.И., Шлезингер А.Е.* Структура арктической глубоководной котловины Северного Ледовитого океана в позднем мезозое – кайнозое по данным сейсмических исследований. В сб.: Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. М., 2012. В. 4. С. 11–28.
8. *Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А. и др.* Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и прилегающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35.
9. *Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А. и др.* Базовая модель тектонического развития Арктики как основа для подготовки обновлённой заявки России в комиссию ООН на установление внешней границы континентального шельфа // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 4–19.
10. *Лобковский Л.И., Вержбицкий В.Е., Кононов М.В. и др.* Геодинамическая модель эволюции Арктического региона в позднем мезозое–кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Арктика: экология и экономика. 2011. № 1. С. 104–115.
11. *Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В.* Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли. 2013. № 6. С. 20–38.
12. Itasca Consulting Group, 2006. FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in Dimensions. Ver. 3.1. User’s Manual. Minneapolis, 2006.
13. *Kazmin Y.B., Laverov N.P., Nikishin A.M., et al.* History of Amerasia Basin in Light of New Data. In: Intern. Conf. “Geological Structure and Evolution Problems of the Arctic Basin in the Context of Submission on the Outer Limits of the Continental Shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean”. Saint-Peterburg. May 27–28, 2014. Compact Disk.
14. *Volozh Yu.A., Antipov M.P., Garagash I.A., Lobkovskii L.I., et al.* Pre-mesozoic Geodynamics of the Precaspian Basin (Kazakhstan) // Sediment. Geol. 2003. V. 156. № 1/4. P. 35–58.